

Ecología de cianoprocariontes epífitas que habitan ambientes lóticos de la Cantera Oriente, Ciudad de México

Ecology of epiphytic cyanoprokaryotes inhabiting lotic environments in Cantera Oriente, Mexico City

Roxana Maceda¹, Rosaluz Tavera² y Eberto Novelo³

¹ Licenciatura en Biología, Facultad de Ciencias, Universidad Nacional Autónoma de México. Circuito Exterior s/n, Ciudad Universitaria, Coyoacán, 04510. CDMX, México
² Departamento de Ecología y Recursos Naturales, Facultad de Ciencias, Universidad Nacional Autónoma de México. Circuito Exterior s/n, Ciudad Universitaria, Coyoacán, 04510. CDMX, México

³ Departamento de Biología Comparada, Facultad de Ciencias, Universidad Nacional Autónoma de México. Circuito Exterior s/n, Ciudad Universitaria, Coyoacán, 04510. CDMX, México
e-mail: r_tavera@ciencias.unam.mx

Recibido: 1 de junio de 2017.

Aceptado: 3 de noviembre de 2017.

Maceda R., R. Tavera y E. Novelo. 2017. Ecología de cianoprocariontes epífitas que habitan ambientes lóticos de la Cantera Oriente, Ciudad de México. *Hidrobiológica* 27 (3): 327-336.

RESUMEN

Antecedentes. La Cantera Oriente alberga un componente de microalgas diverso. Los ecosistemas lénicos han recibido mucha más atención que los sistemas lóticos, lo que hace importante su estudio. **Objetivos.** Comparar comunidades de cianoprocariontes de un ambiente lótico natural y otro artificial, midiendo la densidad y frecuencia relativas de las especies y su asociación con factores ambientales. **Métodos.** Se muestrearon mensualmente las clorofitas filamentosas y la madera y raíces de plantas sumergidas en dos ambientes lóticos (uno natural y otro artificial) de septiembre de 2012 a septiembre de 2013, para estudiar las cianoprocariontes epífitas presentes en ellos. Simultáneamente, se obtuvieron datos fisicoquímicos con mediciones de campo y análisis de laboratorio. Las especies se evaluaron de acuerdo con el Índice de Valor de Importancia (IVI). **Resultados.** Sólo el 31 % de las cianoprocariontes fue compartido por ambos sitios. Los datos fisicoquímicos mostraron igualdad de varianzas y no se correlacionaron con los valores del IVI, denotando un bajo nivel de disturbio ambiental. La comparación estadística proporcional del IVI observado y teórico de las especies de cada ambiente (prueba Chi cuadrada), estableció que las cianoprocariontes se asociaron con el tipo de ambiente, el tipo de sustrato y la estación climática. **Conclusiones.** Los ambientes lóticos de la Cantera Oriente se caracterizan por un bajo nivel de disturbio, que no afecta la presencia ni la biomasa de las cianoprocariontes. El IVI se asocia con el tipo de ambiente y de sustrato como sitio de colonización y parece explicar las preferencias de hábitat para algunas especies.

Palabras clave: Algas bentónicas, arroyos, canales, disturbio, perifiton.

ABSTRACT

Background. Cantera Oriente houses a diverse microalgal component. The lentic ecosystems have received much greater attention than the lotic systems, which makes their study important. **Goals.** Compare cyanoprokaryotic communities found in a natural and an artificial lotic environment. To measure the relative density and frequency of species and to measure their association with environmental factors. **Methods.** Filamentous chlorophytes, wood, and roots of submerged plants were sampled once a month in two lotic environments (natural and artificial) from September 2012 to September 2013, to study the epiphytic cyanoprokaryotes. Simultaneously, physical and chemical data were obtained with field measurements and laboratory analysis. Species were evaluated according to the Importance Value Index (IVI). **Results.** Only 31% of cyanoprokaryotes were shared by both sites. The chemical and physical data showed equal variances and were not correlated with IVI values, denoting a low level of environmental disturbance. The proportional statistical comparison of the observed and theoretical IVI of the species of each environment, (Chi square), established that the cyanoprokaryotes were associated with the type of environment, the type of substrate, and the climatic season. **Conclusions.** The lotic environments in Cantera Oriente are characterized by a low level of disturbance, which does not affect the presence or biomass of the cyanoprokaryotes and the Importance Value Index is associated with the type of environment and substrate as a site of colonization, which seems to explain the habitat preferences of some species.

Key words: Benthic algae, channels, disturbance, periphyton, streams.

INTRODUCCIÓN

La Ciudad de México se encuentra en el Valle de México, donde existió un sistema lacustre con una superficie aproximada de 2,000 km². La urbanización ha provocado una fuerte degradación ambiental en esta zona del país (Conagua, 2010), quedando en la actualidad 3.63 km² de superficie de lagos, de la cual 92.3% pertenece a los lagos de Xochimilco y el resto a los de Chapultepec, Texcoco y San Juan de Aragón (Conagua, 2013). Esta situación resalta la importancia en la conservación de áreas lacustres en el ámbito urbano de la Ciudad de México, como la Cantera Oriente, un ambiente excepcional por su conservación que forma parte de la Reserva Ecológica del Pedregal de San Ángel (REPSA) (Lot, 2007); esta área ha cobrado gran importancia biológica para la ciudad por la diversidad que la caracteriza. En sitios con un alto grado de conservación, las condiciones ambientales tienden a mantenerse estables y el reto es evaluar las respuestas biológicas de las comunidades que los habitan, ya que permiten reconocer gradientes ambientales que ayudan a la evaluación de ecosistemas perturbados, especialmente los de tipo urbano.

Varios estudios de microalgas han mostrado que la Cantera Oriente alberga una gran diversidad, que es ejemplo del manejo adecuado de áreas lacustres inmersas en zonas densamente pobladas (Novelo *et al.*, 2007, 2009; Rodríguez Terán *et al.*, 2014). En estos estudios puede verse que los ecosistemas líticos y la comunidad fitoplancótica han sido los más estudiados, en parte porque los lagos representan 14% de la superficie total (0.075 km²) de la Cantera Oriente. En este trabajo nos hemos enfocado en la comunidad perifítica de cianoprocariontes de los sistemas líticos de la zona, lo que ha aumentado sustancialmente el conocimiento de la diversidad y la ecología de esta área de la REPSA.

Las cianoprocariontes perifíticas contribuyen significativamente a definir el perfil ecológico de los ecosistemas líticos. Biggs (1996) señaló que la interacción entre las algas perifíticas y el ambiente está regulada por dos tipos de factores: las variables que controlan directamente la pérdida o acumulación de biomasa, como nutrientes, temperatura e irradiación, y las variables que influyen de manera indirecta, como el clima y el tipo de sustrato.

Cuando hay un suministro constante de nutrientes y luz en el ambiente, predominan las especies filamentosas de clorofitas (*Cladophora* o *Rhizoclonium*) y las diatomeas pedunculadas (Danilov & Ekelund, 2001; Ensminger *et al.*, 2005); si esto ocurre en ambientes líticos de corrientes suaves con baja frecuencia de inundaciones, en donde la abrasión sobre el sustrato es mínima, la biomasa de algas perifíticas en general alcanza valores altos (Ensminger *et al.*, 2005). Se ha considerado que la herbivoría en estas condiciones sólo ejerce una presión baja o mediana; estas características, en su conjunto, sugieren que el ambiente está funcionando con un disturbio de nivel mediano a bajo (Biggs, 1996; Graba *et al.*, 2014). Los autores citados, especialmente Biggs (1996), proponen que en estas condiciones suelen encontrarse cianoprocariontes Oscillatoriaceae o especies con talos de crecimiento erecto, como miembros de Nostocales, aunque también hay comunidades importantes de epífitas coloniales de cianoprocariontes que crecen sobre clorofitas filamentosas. Esto es lo que hemos observado en los sitios estudiados de la Cantera Oriente y también ha sido descrito en arroyos de la región central de México (Beltrán Magos *et al.*, 2013; Mora Hernández *et al.*, 2015; Novelo, 1998; Ramírez *et al.*, 2003; Valadez Cruz *et al.*, 1996). Los principales objetivos de este estudio fueron comparar las comunidades de cianoprocariontes perifíticas de un am-

biente natural y uno artificial y evaluar el grado de disturbio o equilibrio ambiental a través de la composición de especies, su densidad relativa y su frecuencia relativa, enfocando la interpretación del grado de disturbio con elementos tomados de la bibliografía. Planteamos estos objetivos porque gran parte de la ecología actual de ambientes líticos se ha basado en la comparación entre sustratos naturales y artificiales, empleando a la riqueza y composición de especies perifíticas y bentónicas, así como sus densidades poblacionales (Schneck *et al.*, 2011), biovolumen y biomasa (Murdock & Dodds, 2007; Potapova & Charles, 2005) y actividad metabólica (Fellows *et al.*, 2006) como indicadores de la salud del ecosistema.

Los principales aportes de esta investigación son una caracterización ecológica general de los ambientes líticos de la Cantera Oriente, basada en la biología de las cianoprocariontes perifíticas, y una interpretación sobre la posible existencia de selectividad de sustrato de las microalgas epífitas, con base en la descripción bibliográfica de sus preferencias de hábitat (Fattom & Shilo, 1984; Fellows *et al.*, 2006; Michael *et al.*, 2008; Potapova & Charles, 2005; Schneck *et al.*, 2011).

MATERIALES Y MÉTODOS

Área de estudio y sitios de recolección. La Cantera Oriente está ubicada al sur de la Ciudad de México y cuenta con 0.075 km² de terreno (Lot, 2007). Se incorporó a la REPSA en diciembre de 1996. En ella existen cuatro unidades ambientales o de paisaje (Fig. 1): A) paisaje lacustre y de humedales, B) paisaje de jardines, C) paisaje de bosques y arbustos y D) paisajes construidos. La unidad de paisaje lacustre y de humedales está subdividida en: cuerpos de agua (14.36% de la superficie), planicie palustre o de ciénaga (zonas que bordean a los cuerpos de agua), que representa 23.21% de la superficie, y zonas inundables que constituyen 4.85% de la superficie total de la Cantera (Lot, 2007; Ortiz Pérez *et al.*, 2007).

Se eligieron dos sitios de recolección en donde se observó la presencia de cianoprocariontes perifíticas, los cuales se denominaron "arroyo" y "canal" (Fig. 2a-b), de acuerdo con el estado natural o artificial del ambiente. El arroyo (sitio natural) es una desviación del agua que escurre por la pared noroeste de la Cantera. Se ubica en la unidad ambiental de paisajes de bosques y arbustos, en la subdivisión de plano ondulado de relleno con vegetación arbórea cerrada, que representa una comunidad forestal diversa, con un techo arbóreo denso (Ortiz Pérez *et al.*, 2007). En las orillas del arroyo se encuentran principalmente cipreses (*Cupressus sempervirens* Linnaeus) y tepozanes (*Buddleja cordata* Kunth), mientras que dentro del arroyo se pueden encontrar plantas herbáceas, principalmente *Stuckenia pectinata* (Linnaeus) Börner, una macrófita sumergida. El otro sitio estudiado fue un canal de concreto (sitio artificial) poco profundo, de lecho plano y paredes verticales, que fue construido para nivelar el volumen de agua en época de lluvias y conecta el agua que proviene de la pared de la Cantera con el lago Vaso Regulador. Se encuentra dentro de la unidad ambiental de paisajes con jardines y se caracteriza por estar rodeado principalmente por fresnos (*Fraxinus uhdei* (Wenzig) Lingelsh) y liquidámbar (*Liquidambar styraciflua* Linnaeus) (Ortiz Pérez *et al.*, 2007).

Recolección en campo. Durante un año (septiembre 2012 - septiembre 2013) se recolectaron mensualmente muestras en el arroyo y el canal. En el arroyo, se recolectaron clorofitas filamentosas sumergidas (*Rhizoclonium hieroglyphicum* (C. Agardh) Kützing), macrófitas (*S.*



Figura 1. Sitios de recolección en la Cantera Oriente (Ciudad de México, México). La flecha superior señala la ubicación del arroyo y la flecha inferior señala la ubicación del canal. En el sector Este se aprecia la zona de lagos. Fuente: Google Earth, 2013 (periodo de recolección).

pectinata) y raíces o madera sumergidas de *B. cordata*; en el canal se recolectaron talos del único sustrato vegetal, la clorofita filamentosa sumergida *Cladophora glomerata* (Linnaeus) Kützing. A partir de estas recolecciones se obtuvieron cianoprocariontes epífitas, mediante raspado con una navaja o toma directa. Los raspados del material epífito se realizaron en el laboratorio.

En cada recolección se midieron la irradianza subsuperficial (Hobo®), el pH, la temperatura y la conductividad (potenciómetro Conductronic PC-18®) y el oxígeno disuelto (oxímetro Conductronic Ox-25®) del agua. En el laboratorio, empleando muestras de agua recolectadas en cada ocasión, se determinaron los nutrientos por métodos espectrofotométricos (espectrofotómetro Hach DR 1900®), estandarizados (Rice *et al.*, 2017). Todos los métodos están basados en los estándares aprobados para el análisis de agua dulce de la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (USEPA, 2017). El fósforo total se obtuvo por el método de digestión ácida (EPA 365.1, 365.3, 8190), las determinaciones de nitrato se hicieron mediante el método de reducción de cadmio (EPA 353.2, 8171), las de nitrito por el método de diazotización (EPA 353.2, 8507) y las de amonio con el método del salicilato (EPA 350.1, 10023).

Las muestras para determinación de especies fueron preservadas con formol a 2.5%, material con el cual se realizaron preparaciones semipermanentes con gelatina glicerinada (González & Novelo, 1986).

La documentación se realizó con un microscopio Nikon 80i® (con contraste de interferencia diferencial). El material (preparaciones y muestras líquidas) se incorporó al Herbario de la Facultad de Ciencias (FCME).

Análisis biológico de las especies. Debido a la diversidad de sustratos que son colonizados por las cianoprocariontes perifíticas, se evaluó la presencia y la composición de las especies en las comunidades, considerando su densidad relativa y frecuencia relativa (Tabla 1), de acuerdo con el Índice de Valor de Importancia (IVI), modificado con base en el utilizado en estudios de ecología vegetal (Nguyen *et al.*, 2014).

Manejo estadístico de los datos. Las variables cuantitativas consideradas en el estudio se señalan en la Tabla 2. El nitrógeno inorgánico total disuelto (NID) se obtuvo sumando los valores de las tres formas inorgánicas determinadas y se utilizó para obtener la proporción de nitrógeno con respecto al fósforo (NP). El cálculo del coeficiente de variación (Microsoft Excel 2017) permitió establecer inicialmente la precisión de los datos (Tabla 2). Se utilizó el programa XLSTAT (Addinsoft, para Microsoft Excel 2017) y se analizó si los datos cumplieron con una distribución normal, aplicando una prueba de Kolmogorov-Smirnov. Se normalizaron los datos (transformación LN+1) y se aplicaron pruebas de contraste de medias paramétricas y no paramétricas (Levene, prueba T y Mann-Whitney). Para evaluar la posible asociación entre la presencia de especies y el tipo de ambiente (natural o artificial), se



Figura 2a-b. Sitios de muestreo en la Cantera Oriente (Ciudad de México, México). a) Vista parcial del sitio natural denominado "arroyo". b) Vista parcial del sitio artificial denominado "canal".

aplicó una prueba de asociación no paramétrica con el estadístico Chi cuadrada, mediante la creación de una tabla de contingencia. Las variables cualitativas consideradas para Chi cuadrada fueron el tipo de sustrato (alga, macrófita o arbusto), el tipo de ambiente (arroyo o canal) y la época (seca o de lluvias).

RESULTADOS

Se encontraron 13 especies de cianoprocariontes (Tabla 3); de ellas sólo 31% es compartido por ambos sitios. La evaluación cuantitativa de su distribución y presencia se hizo con base en el IVI (Tabla 3), que se aplicó modificando la propuesta de Nguyen *et al.* (2014).

Una comparación proporcional de las especies de cada ambiente, de acuerdo con el IVI, mostró una representatividad diferente para cada especie, asociada con las variables cualitativas consideradas en el estudio: tipo de ambiente (arroyo (Fig. 3) y canal (Fig. 4)), la estación climática (época seca o de lluvias) y el tipo de sustrato (macrófita, alga o arbusto).

Análisis de los datos. Los datos de variables ambientales registrados en este estudio (Tabla 2) mostraron igualdad de varianzas; de acuerdo con el coeficiente de variación, solo la temperatura y la conductividad

tuvieron precisión aceptable (<10%). La correlación de Pearson para estas variables no fue significativa para los valores de IVI ($p > 0.05$; $N = 19$). El análisis exploratorio de los datos cuantitativos obtenidos para el conjunto de variables indicó que no tienen una distribución normal (prueba de Kolmogorov-Smirnov, $p < 0.05$). Las pruebas de contraste de medias aplicadas a los datos normalizados indicaron que podemos asumir igualdad de varianza en cada variable ($p > 0.05$ para la prueba de Levene y $p > 0.05$ bilateral para la prueba T de igualdad de medias).

El análisis no paramétrico aplicado a los mismos datos normalizados también mostró que la diferencia de posición entre las muestras fue igual a cero (prueba de Mann-Whitney, $p > 0.05$), excepto para el nitrógeno ($p < 0.05$).

Una tabla de contingencia de los datos mostró la asociación entre las variables de naturaleza cualitativa (Tabla 4, Fig. 5). El resultado de la prueba de Chi cuadrada, con $p < 0.05$, estableció marcadas diferencias en el crecimiento de las cianoprocariontes en cada ambiente. Se aceptó por tanto la hipótesis alternativa de la prueba (Tabla 5), lo que indica que hay dependencia entre filas y columnas de la tabla de contingencia. Esto fue comprobado mediante las frecuencias teóricas y de proporciones y columnas (Tabla 6), que especificaron una magnitud de asociación de las especies con cada tipo de ambiente, dependiendo tanto del sustrato como de la estación climática.

Tabla 1. Ecuaciones para calcular el Índice de Valor de Importancia (IVI) de especies con la suma de la densidad relativa y la frecuencia relativa. Modificado de Nguyen *et al.*, 2014. La densidad relativa es la presencia de talos por preparación para cada especie; el área total muestreada es el número de preparaciones (cubreobjetos de 20×20 mm) en las que se registraron los talos de cada especie.

Densidad relativa	Densidad de una especie + densidad total de todas las especies x 100
Frecuencia relativa	Frecuencia de una especie + frecuencia total de todas las especies x 100
Densidad	Número de veces presencia de una especie + total del área muestreada
Frecuencia	Área de preparaciones en la cual se observó una especie + Área total muestreada

Tabla 2. Datos fisicoquímicos monitoreados en el arroyo y el canal en la Cantera Oriente (Ciudad de México, México). La relación nitrógeno-fósforo (N:P) se obtuvo sumando los valores del nitrógeno inorgánico disuelto y dividiéndolos entre los valores de fósforo total para cada fecha.

Sitio	Fecha	Temp. (Celsius)	pH (unidades)	Conduct. (μScm^{-1})	O_2 (mg l^{-1})	Irradianza ($\text{mmol s}^{-1} \text{m}^{-2}$)	N:P	IVI
Arroyo	04/09/2012	15.4	8.3	388	6.6	221.8	58.3	7.02
Arroyo	01/10/2012	15.3	7.1	380	4.5	1080.2	213.3	14.04
Arroyo	22/01/2013	13.6	5.9	402	1.2	1.8	880.8	17.54
Arroyo	20/02/2013	14.0	6.6	412	3.1	212.2	69.4	17.54
Arroyo	22/03/2013	17.3	7.8	367	2.3	1466.0	9.9	31.58
Arroyo	22/04/2013	14.6	7.3	432	1.8	327.9	5.6	17.54
Arroyo	24/05/2013	14.6	7.2	433	0.9	86.8	5.8	35.09
Arroyo	24/06/2013	15.3	7.6	391	1.3	655.8	3.5	42.11
Arroyo	25/09/2013	15.1	6.5	392	4.5	462.9	0.8	17.54
Canal	01/10/2012	15.8	7.2	396	6.4	694.4	1054.5	8.22
Canal	05/11/2012	15.1	5.3	390	0.9	24.1	58.7	16.67
Canal	22/01/2013	14.6	5.5	421	3.0	2.7	71.0	22.22
Canal	20/02/2013	15.3	6.6	383	3.0	144.7	567.2	22.22
Canal	22/03/2013	16.5	7.5	380	1.5	260.4	148.1	13.89
Canal	22/04/2013	15.6	7.3	386	2.1	2006.1	11.9	11.11
Canal	24/05/2013	15.4	7.4	373	1.2	106.1	7.1	19.44
Canal	24/06/2013	15.4	7.5	376	1.2	120.6	9.1	36.11
Canal	25/07/2013	15.4	6.4	382	3.5	366.5	6.4	41.67
Canal	27/08/2013	15.4	6.7	389	5.8	1041.6	7.3	11.11
Desv. Estándar		0.81	0.77	18.83	1.88	551.53	312.61	10.89
Media aritmética		14.53	6.61	374.59	2.83	491.70	175.05	20.68
Coeficiente Variación		0.06	0.12	0.05	0.66	1.12	1.79	0.53
Expresión porcentual		5.6%	11.6%	5.0%	68.7%	112.2%	178.5%	52.7%

IVI = Índice de valor de importancia.

DISCUSIÓN

Las pruebas estadísticas aplicadas tuvieron por objeto demostrar la existencia de asociaciones entre las especies de cianoprocariontes y las condiciones fisicoquímicas de los ambientes lóticos estudiados, el arroyo y el canal. Los análisis aplicados para explicar los resultados no mostraron ningún tipo de asociación entre las especies (variable dependiente) y las variables físicas o químicas. Como el seguimiento del muestreo fue amplio, continuo y estuvo basado en la evaluación de las especies mediante el índice de importancia calculado (valores de IVI), pensamos que existen suficientes datos para sustentar la propuesta de que las condiciones del medio son estables y no se relacionan directamente con las diferencias en presencia de las especies en ninguno de los sitios. Esto se reflejó particularmente en los resultados de las pruebas para explorar la normalidad y homogeneidad de varianzas, que al incumplir los supuestos estadísticos mínimos para las variables no sugirieron que fuera pertinente hacer una indagación mayor.

Es bastante notable que los factores fisicoquímicos medidos en ambos ambientes se hayan mantenido extremadamente constantes durante el periodo de muestreo (de ahí que no exista variabilidad suficiente de los datos), porque esto y la composición de especies, sumada a las densidades y frecuencias relativas de su crecimiento, se ajustan a la propuesta de Biggs (1996) y a lo sugerido por otros autores con base en esta propuesta (Danilov & Ekelund, 2001; Ensminger *et al.* 2005), que indican que en la Cantera Oriente los ambientes lóticos tienen un nivel de disturbio bajo y presentan un buen escenario para el desarrollo de las especies de cianoprocariontes perifíticas observadas. Los resultados muestran que el suministro de nutrientes es constante y que no hay limitación por la luz, puesto que las cianoprocariontes no modifican su valor de IVI en función de la variabilidad de la irradianza. Asimismo, la abrasión de la corriente no las afecta, ya que se fijan sobre dos sustratos algales (*C. glomerata* y *R. hieroglyphicum*), que son indicadores de velocidades de corriente moderadas a bajas (Ensminger

et al., 2005). De acuerdo con Biggs (1996) y Graba *et al.* (2014), en esta categoría de ambientes con bajo nivel de disturbio la herbivoría no influye en la pérdida de biomasa. Aunque no evaluamos la presión de herbivoría, pensamos que en el caso de los sitios estudiados también se cumple esta característica, así que las diferencias de crecimiento de las especies (IVI) no modificarán la biomasa del conjunto de perifiton a largo plazo. Esto significa que estas especies tenderán a mantenerse como habitantes epífitos en los sitios lóticos de la Cantera Oriente.

Aun considerando el bajo nivel de disturbio de estos ambientes, un aspecto importante fue averiguar si la presencia de las especies

o su capacidad de crecimiento, representada por el IVI, dependían de la condición natural o artificial de cada ambiente, de la época del año o del tipo de sustrato colonizable (Tabla 4). Destaca el hecho de que sólo 31% de las especies son compartidas entre los sitios (*Xenococcus bicudoi* Montejano, Gold *et al.* Komárek), *Leibleinia epiphytica* (Hieronymus) Compère, *Phormidium aerugineo-caeruleum* (Gomont) Agagnostidis *et al.* Komárek y *Pseudanabaena catenata* Lauterborn) (Tabla 2), pues aunque el ambiente sea homogéneo y estable, no todas las especies crecen en todos los sitios o sustratos y aun si fuera así, no crecen con la misma densidad poblacional ni con la misma frecuencia, de acuerdo con las diferencias observadas en el IVI.

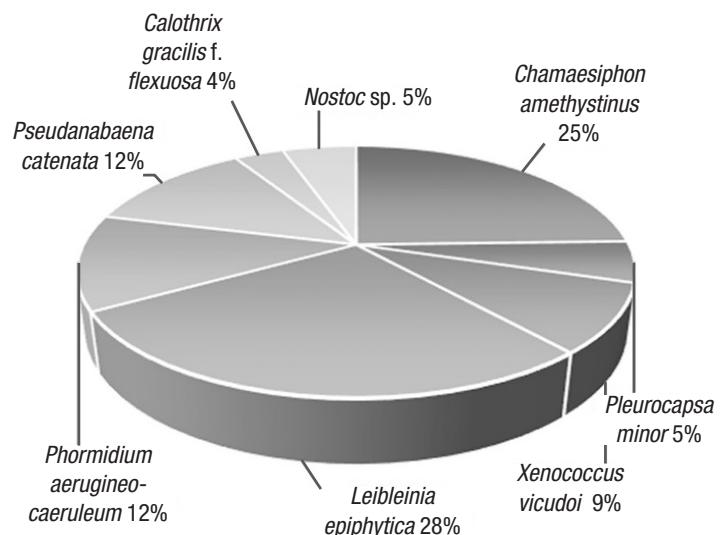


Figura 3. Expresión porcentual del IVI de cada especie en el sitio arroyo, Cantera Oriente (Ciudad de México, México). *Leibleinia epiphytica* y *Chamaesiphon amethystinus* destacaron por su densidad y frecuencia en todos los sustratos.

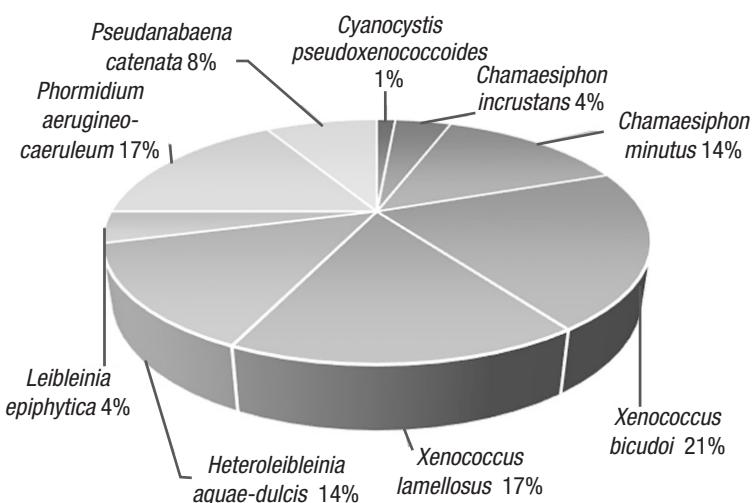


Figura 4. Expresión porcentual del IVI de cada especie en el sitio canal, Cantera Oriente (Ciudad de México, México). *Xenococcus bicudoi*, *X. lamellosum* y *Phormidium aerugineo-caeruleum* destacaron por su dominancia y frecuencia sobre *C. glomerata*.

Tabla 3. Datos para la construcción de la tabla de contingencia, utilizada en la prueba de Chi cuadrada. Se muestran las especies organizadas por época climática en cada sitio de la Cantera Oriente (Ciudad de México, México). Los valores de IV se corresponden con el sustrato sobre el que crecieron.

Sitio	Época	Especie	IV en <i>Stuckenia</i> (macrofita)	IV en <i>Rhizoclonium</i> (alga)	IV en <i>Buddleja</i> (arbusto)	IV en <i>Cladophora</i> (alga)
arroyo	seca	<i>Chamaesiphon amethystinus</i> (Rostafinski) Lemmermann	14.04	24.56	0.00	0.00
arroyo	seca	<i>Xenococcus bicolor</i> Montejano, Gold <i>et</i> Komárek	10.53	0.00	0.00	0.00
arroyo	seca	<i>Leibleinia epiphytica</i> (Hieronymus) Compère	17.54	10.53	0.00	0.00
arroyo	seca	<i>Phormidium aeruginaceoceruleum</i> (Gomont) Anagnostidis <i>et</i> Komárek	14.04	7.02	0.00	0.00
arroyo	seca	<i>Pseudanabaena catenata</i> Lauterborn	10.53	10.53	0.00	0.00
arroyo	lluvias	<i>Chamaesiphon amethystinus</i> (Rostafinski) Lemmermann	0.00	10.53	0.00	0.00
arroyo	lluvias	<i>Pleurocapsa minor</i> Hansgirg	0.00	0.00	10.53	0.00
arroyo	lluvias	<i>Xenococcus bicolor</i> Montejano, Gold <i>et</i> Komárek	0.00	3.51	3.51	0.00
arroyo	lluvias	<i>Leibleinia epiphytica</i> (Hieronymus) Compère	0.00	17.54	10.53	0.00
arroyo	lluvias	<i>Phormidium aeruginaceoceruleum</i> (Gomont) Anagnostidis <i>et</i> Komárek	0.00	3.51	0.00	0.00
arroyo	lluvias	<i>Pseudanabaena catenata</i> Lauterborn	0.00	3.51	0.00	0.00
arroyo	lluvias	<i>Calothrix gracilis</i> f. <i>flexuosa</i> Fritsch	0.00	0.00	7.02	0.00
arroyo	lluvias	<i>Nostoc</i> sp.	0.00	3.51	7.02	0.00
canal	seca	<i>Chamaesiphon incrustans</i> Grunow	0.00	0.00	0.00	2.78
canal	seca	<i>Chamaesiphon minutus</i> (Rostafinski) Lemmermann	0.00	0.00	0.00	8.33
canal	seca	<i>Xenococcus bicolor</i> Montejano, Gold <i>et</i> Komárek	0.00	0.00	0.00	25.00
canal	seca	<i>Xenococcus lamellosus</i> Gold-Morgan, Montejano <i>et</i> Komárek	0.00	0.00	0.00	13.89
canal	seca	<i>Heteroleibleinia aquaedulcis</i> (Skuja) Anagnostidis	0.00	0.00	0.00	11.11
canal	seca	<i>Leibleinia epiphytica</i> (Hieronymus) Compère	0.00	0.00	0.00	2.78
canal	seca	<i>Phormidium aeruginaceoceruleum</i> (Gomont) Anagnostidis <i>et</i> Komárek	0.00	0.00	0.00	19.44
canal	seca	<i>Pseudanabaena catenata</i> Lauterborn	0.00	0.00	0.00	5.56
canal	lluvias	<i>Cyanocystis pseudozenaococcoides</i> (Bourrelly) Bourrelly	0.00	0.00	0.00	2.78
canal	lluvias	<i>Chamaesiphon incrustans</i> Grunow	0.00	0.00	0.00	5.56
canal	lluvias	<i>Chamaesiphon minutus</i> (Rostafinski) Lemmermann	0.00	0.00	0.00	19.44
canal	lluvias	<i>Xenococcus bicolor</i> Montejano, Gold <i>et</i> Komárek	0.00	0.00	0.00	16.67
canal	lluvias	<i>Xenococcus lamellosus</i> Gold-Morgan, Montejano <i>et</i> Komárek	0.00	0.00	0.00	19.44
canal	lluvias	<i>Heteroleibleinia aquaedulcis</i> (Skuja) Anagnostidis	0.00	0.00	0.00	16.67
canal	lluvias	<i>Leibleinia epiphytica</i> (Hieronymus) Compère	0.00	0.00	0.00	5.56
canal	lluvias	<i>Phormidium aeruginaceoceruleum</i> (Gomont) Anagnostidis <i>et</i> Komárek	0.00	0.00	0.00	13.89
canal	lluvias	<i>Pseudanabaena catenata</i> Lauterborn	0.00	0.00	0.00	11.11

IV = Índice de valor de importancia.

Tabla 4. Tabla de contingencia de Chi cuadrada. Cada tipo de sustrato reunió el IVI de las especies para cada época climática y sitio en la Cantera Oriente (Ciudad de México, México).

	<i>Stuckenia</i> (macrófita)	<i>Rhizoclonium</i> (alga)	<i>Buddleja</i> (arbusto)	<i>Cladophora</i> (alga)
Arroyo, época seca	66.67	52.63	0	0
Arroyo, época lluvia	0	42.11	38.6	0
Canal, época seca	0	0	0	88.89
Canal, época lluvia	0	0	0	111.11

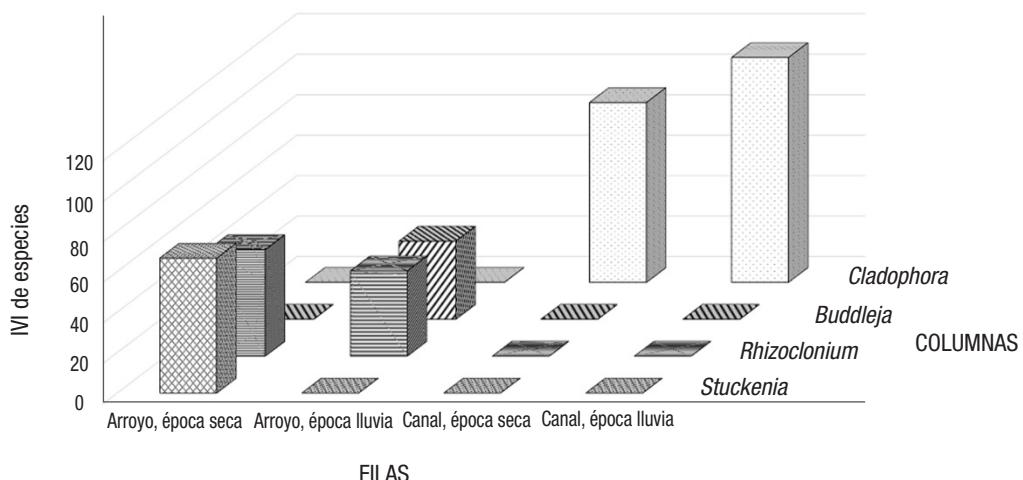


Figura 5. Presentación gráfica de la tabla de contingencia. La proporción de individuos en cada columna sugirió una asociación entre las variables cualitativas seleccionadas.

Tabla 5. Resultado de la prueba de independencia entre las filas y columnas, producida por la prueba de Chi cuadrada. El valor de p calculado fue menor a la significación de alfa. El riesgo de rechazo de la hipótesis nula (H_0), en caso de ser verdadera, fue menor a 0.01%.

Chi cuadrada	605.645
Chi cuadrada	16.919
GL	9
valor- p	< 0.0001
alfa	0.05

Un análisis para variables cualitativas, asociando el tipo de sustrato, el tipo de ambiente, la época del año y la forma como crecen las especies, realizado con la prueba Chi cuadrada, comprobó que los valores de IVI son muy diferentes dependiendo del sustrato en que crecen las especies y, tal como fue construida la tabla de contingencia, muestra que se relacionan tanto con la época del año como con el tipo de ambiente (Tablas 3-4).

La dependencia de las especies con el tipo de sustrato sobre el que crecen podría ocurrir al azar, considerando que el canal cuenta con un único sustrato vegetal disponible (la clorofita filamentosa *C. glomerata*) y la presencia de concreto, pero no ocurrió así. En el arroyo existe una gama más amplia de sustratos posibles (*R. hieroglyphicum*, *S. pectinata* y *B. cordata*) y tanto la densidad poblacional como la frecuencia de las especies mostraron que la presencia de especies específicas no ocurre al azar. De las especies compartidas entre el arroyo y el canal, *L. ephiphytica* y *X. bicudo* no están restringidas por el ambiente, sustrato o época del año, mientras que *P. aeruginocaeeruleum* y *P. catenata* están restringidas por el tipo de sustrato y la época. Ninguna de estas especies compartidas muestra una diferencia entre las clorofitas filamentosas y todas crecen indistintamente sobre *C. glomerata* o *R. hieroglyphicum*.

Las demás especies presentan otros gradientes de restricciones que las asocian de modo diferente con el tipo de ambiente, época o sustrato. En el arroyo las especies particulares fueron *C. gracilis* f. *flexuosa* Fritsch, con IVI 4% (restricción amplia: tipo de sustrato, época y tipo de ambiente), *Nostoc* sp., con IVI 5% (restricción media: época del año y tipo de ambiente) y *Chamaesiphon amethystinus* (Rostafinski) Lemmermann, con IVI 25% (restricción baja: únicamente tipo de ambiente). El gradiente de restricción ambiental está bien reflejado por el

Tabla 6. Frecuencias teóricas y proporciones por columna. Las frecuencias teóricas mostraron valores siempre superiores a 5.0 y algunas proporciones entre filas y columnas mostraron diferencias significativas, lo que hace robusto el resultado de Chi cuadrada sobre la exactitud de Fisher.

Frecuencias teóricas	<i>Stuckenia</i> (macrófita)	<i>Rhizoclonium</i> (alga)	<i>Buddleja</i> (arbusto)	<i>Cladophora</i> (alga)	Total
Arroyo, época seca	19.884	28.255	11.512	59.649	119.300
Arroyo, época lluvia	13.452	19.116	7.788	40.354	80.710
Canal, época seca	14.815	21.053	8.578	44.444	88.890
Canal, época lluvia	18.519	26.316	10.722	55.554	111.110
Proporciones					
Total	66.67	94.74	38.6	200	400.01
Arroyo, época seca	1.000	0.556	0.000	0.000	0.298
Arroyo, época lluvia	0.000	0.444	1.000	0.000	0.202
Canal, época seca	0.000	0.000	0.000	0.444	0.222
Canal, época lluvia	0.000	0.000	0.000	0.556	0.278
Total	1	1	1	1	1

valor del IVI, que se incrementó de forma inversamente proporcional al nivel de restricción; ésto sugiere que la densidad poblacional y la frecuencia de presencia que alcanza cada especie son resultado de las condiciones adecuadas para su fijación, aun cuando el ambiente se mantenga estable.

En el canal, todas las especies crecen sobre el único sustrato vegetal disponible (*C. glomerata*). En este sentido sobresale *Xenococcus bicudo*, que aun pudiendo colonizar cualquiera de los sustratos y ambientes creció mucho mejor en el canal, con IVI 21% en la época seca y la de lluvias. Las demás especies del canal, no compartidas con el arroyo, se desarrollan bien (por sus valores de IVI) durante la época seca o lluviosa. Como excepciones destacan *Cyanocystis pseudoxenococcoïdes* (Bourrelly) Bourrelly y *Chamaesiphon incrustans* Grunow, descritas como epífitas en latitudes tropicales (particularmente *C. pseudoxenococcoïdes*) y que no fueron observadas sobre el concreto, sino que únicamente crecieron en bajas densidades como epífitas de *C. glomerata*. Pensamos que esto se debe a la respuesta hidrofóbica particular del mucílago (Fattom & Shilo, 1984; Michael *et al.*, 2008), pues el canal tiene paredes verticales, lo que se ha observado que es un factor que afecta de forma general el establecimiento de las cianoprocariontes perifíticas (Michael *et al.*, 2008). *C. glomerata* no representa entonces el sustrato óptimo para estas especies y aunque crecen, lo hacen en forma limitada (Fig. 4). Nuestras observaciones de las especies de cianoprocariontes epífitas nos permiten concluir que los ambientes lóticos de la Cantera Oriente se caracterizan por un bajo nivel de disturbio, ya que la presencia y la biomasa de las cianoprocariontes perifíticas no se modifican sensiblemente durante los períodos climáticos. Asimismo, de acuerdo con el objetivo principal de comparar las comunidades de cianoprocariontes perifíticas entre un ambiente natural y uno artificial, concluimos que las respuestas biológicas específicas ante la condición natural o artificial del ambiente, asociadas con el tipo de sustrato biológico como sitio de colonización, parecen explicar las preferencias de

hábitat para algunas especies, pero puede haber gradientes ambientales más sutiles relacionados con el perfil biológico de las especies y que es necesario estudiar en relación con los ciclos de vida en cultivos. Esta perspectiva tiene un respaldo firme, porque los estudios de fitopláncton en los ambientes lóticos de la Cantera Oriente hasta ahora sugieren un escenario muy diferente al de los ambientes lóticos; es decir, un recambio muy rápido de especies que refleja una importante diversidad beta (Rodríguez Terán *et al.*, 2014).

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos al biólogo Francisco Martínez, secretario auxiliar de la Cantera Oriente, por el apoyo técnico durante el desarrollo del proyecto y a la M. en C. Guadalupe Vidal por el apoyo técnico en la determinación de nutrientos.

REFERENCIAS

BELTRÁN MAGOS, Y., J. CARMONA JIMÉNEZ, G. VILA CLARA FATJO & M. G. BOJORGE GARCÍA 2013. Calcificación de la cianobacteria filamentosa *Blennothrix ganeshii* en ríos calcáreos tropicales de la región central de México. *Hidrobiológica* 23: 17-27.

BIGGS, B. F. F. 1996. Patterns in Benthic Algae of Streams. In: Stevenson, R. J., Botwell, M. L., & Lowe, R. L. (Eds.) *Algal ecology. Freshwater benthic ecosystems*. Academic Press, San Diego, pp. 31-56.

CONAGUA (COMISIÓN NACIONAL DEL AGUA). 2010. *Compendio del Agua de la Región Hidrológico-Administrativa XIII. Edición 2010. Lo que se debe saber del Organismo de Cuenca Aguas del Valle de México*. Coordinación General de Atención Institucional, Comunicación y Cultura del Agua. Comisión Nacional del Agua, D.F. 190 p. Disponible en línea en: https://www.google.com.mx/?gfe_rd=cr&e

i=QeeXVvLoNsSt8weZr4aQDg#q=.+Lo+que+se+debe+saber+del+Organismo+de+Cuenca+Aguas+del+Valle+de+M%C3%A9xico.

CONAGUA (COMISIÓN NACIONAL DEL AGUA). 2013. *Estadísticas del Agua de la Región Hidrológico-Administrativa XIII*. Organismo de Cuenca Aguas del Valle de México. Comisión Nacional del Agua. 204 p. Disponible en línea en: https://agua.org.mx/component/docman/doc_download/2607.

DANILOV, R. A. & N. G. A. EKELUND. 2001. Comparison of usefulness of three types of artificial substrata glass, wood and plastic when studying settlement patterns of periphyton in lakes of different trophic status. *Journal of Microbiological Methods* 45: 167-170.

ENSMINGER, I., J. FOERSTER, C. HAGEN & W. BRAUNE. 2005. Plasticity and acclimation to light reflected in temporal and spatial changes of small-scale macroalgal distribution in a stream. *Journal of Experimental Botany* 56 (418): 2047-2058.

FATTOM, A. & M. SHILO. 1984. Hydrophobicity as an Adhesion Mechanism of Benthic Cyanobacteria. *Applied Environmental Microbiology* 47 (1): 135-143. (Disponible en línea en: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC239625/>

FELLOWS, C. S., J. E. CLAPCOTT, J. W. UDY, S. BUNN, B. D. HARCH, M. J. SMITH & P. M. DAVIES. 2006. Benthic Metabolism as an Indicator of Stream Ecosystem Health. *Hydrobiologia* 572 (1): 71-87. DOI: 10.1007/s10750-005-9001-6

GONZÁLEZ GONZÁLEZ, J. & E. NOVELO MOLDONADO. 1986. Algas. In: Lot, A. y F. Chiang (Comps.). *Manual de Herbario: Administración y manejo de colecciones, técnicas y preparación de ejemplares botánicos*. Consejo Nacional de la Flora de México A. C., México, pp. 47- 54.

GRABA, M., S. SAUVAGE, M. NABIL, M. BENOÎT, M. FRÉDÉRIC, G. URREA, E. BUFFAN DUBAU, M. TACKX, S. SABATER & J. M. SÁNCHEZ PÉREZ. 2014. Modelling epilithic biofilms combining hydrodynamics, invertebrate grazing and algal traits. *Freshwater Biology*. 56 (6): 1213-1228 DOI:10.1111/fwb.12341

LOT, A. 2007. La Cantera Oriente: A manera de introducción. In: Lot, A. (Coord.) *Guía Ilustrada de la Cantera Oriente. Caracterización Ambiental e Inventario Biológico*. Coordinación de la Investigación Científica, UNAM, México. pp. 7-11.

MICHAEL, T. S., H. W. SHIN, R. HANNA & C. D. SPAFFORD. 2008. A review of epiphyte community development: Surface interactions and settlement on seagrass. *Journal of Environmental Biology* 29 (4): 629- 638.

MORA HERNÁNDEZ, L. D., J. CARMONA JIMÉNEZ & E. A. CANTORAL URIZA. 2015. Diatomáceas epilíticas de la cuenca alta del río Laja, Guanajuato, México. *Revista Mexicana de Biodiversidad* 86: 1024-1040.

MURDOCK, J. N. & W. K. DODDS. 2007. Linking benthic algal biomass to stream substratum topography. *Journal of Phycology* 43 (3): 449- 460. DOI: 10.1111/j.1529-8817.2007.00357.x

NGUYEN, H., D. LAMB, J. HERBOHN & J. FIRN. 2014. Designing Mixed Species Tree Plantations for the Tropics: Balancing Ecological Attributes of Species with land-holder preferences in the Philippines. *PLoS ONE* 9 (4): e95267. DOI: 10.1371/journal.pone.0095267.t002

NOVELO, E. 1998. Floras ficológicas del Valle de Tehuacán, Puebla. Tesis de Doctorado en Ciencias (Biología), Facultad de Ciencias, UNAM, México. pp. 1-599.

NOVELO, E., E. PONCE, R. RAMÍREZ & M. RAMÍREZ. 2007. Algas. In: Lot, A. (Coord.) *Guía Ilustrada de la Cantera Oriente. Caracterización Ambiental e Inventario Biológico*. Coordinación de la Investigación Científica, UNAM, México, pp. 63-95.

NOVELO, E., M. E. PONCE & R. RAMÍREZ. 2009. Las microalgas de la Cantera Oriente. In: Lot, A. y Z. CANO SANTANA (Eds.). *Biodiversidad del ecosistema del Pedregal de San Ángel*. Universidad Nacional Autónoma de México, México, pp. 71-80.

ORTIZ PÉREZ, M. A., J. M. FIGUEROA, M. P. MAH ENG, G. SALAZAR ENCISO, G. PARADA COLÍN & L. CASTILLO TÉLLEZ. 2007. Unidades Ambientales. In: Lot, A. (Coord.) *Guía Ilustrada de la Cantera Oriente. Caracterización Ambiental e Inventario Biológico*. Coordinación de la Investigación Científica, UNAM, México, pp. 15-42.

POTAPOVA, M. & D. F. CHARLES. 2005. Choice of substrate in algae-based water-quality assessment. *Journal of the North American Benthological Society* 24 (2): 415-427. DOI: 10.1899/03-111.1

RAMÍREZ VÁZQUEZ, M. & E. A. CANTORAL URIZA. 2003. Flora algal de ríos templados en la zona occidental de la cuenca del Valle de México. *Anales del Instituto de Biología. Universidad Nacional Autónoma de México* 74: 143-194.

RICE, E. W., R. B. BAIRD & A. D. EATON (Eds.). 2017. *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*. American Water Works Association/American Public Works Association/Water Environment Federation, 2017, 23 RD Edition, pp. 1-250.

RODRÍGUEZ TERÁN, E., M. ELIAS LARA, H. H. CHAN MOU, R. TAVERA & E. NOVELO. 2014. La ficolflora de la Cantera Oriente de la Reserva Ecológica del Pedregal de San Ángel de la UNAM, un sistema florístico en cambio constante. Resúmenes, X Congreso de Ficología de Latinoamérica y el Caribe. SOFILAC. Metepec, Estado de México. Resumen Eco-62. p 220.

SCHNECK, F., A. SCHWARZBOLD & A. S. MELO. 2011. Substrate roughness affects stream benthic algal diversity, assemblage composition, and nestedness. *Journal of North American Benthological Society* 30 (4):1049-1056. DOI: 10.1899/11-044.1

USEPA. 2017. *Science and Research at the United States Environmental Protection Agency*. EPA Progress Report 2012, Office of Research and Development. (Disponible en línea en: <http://nepis.epa.gov/Exe/ZyPURL.cgi?Dockey=30000Q10.txt>.)

VALADEZ CRUZ, F., CARMONA JIMÉNEZ, J. & CANTORAL URIZA, E. 1996. Algas de ambientes lóticos en el Estado de Morelos, México. *Anales del Instituto de Biología. Universidad Nacional Autónoma de México* 67: 227-282.